

## COPRODUTOS DE SIDERURGIA: COMO A ECONOMIA CIRCULAR NA INDÚSTRIA PODE AJUDAR A DESCARBONIZAÇÃO DA AGRICULTURA\*

*Eliane de Paula Clemente<sup>1</sup>  
João Herbert Moreira Viana<sup>2</sup>*

### Resumo

Existe uma pressão política para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para promover medidas mitigatórias e a economia circular, eliminando resíduos e atendendo as metas de emissões do atual governo. Há estratégias de captura de carbono, como a reação do CO<sub>2</sub> com silicatos que imitam os processos naturais de intemperismo de rochas e capturam CO<sub>2</sub> enquanto corrigem a acidez do solo para a agricultura. O objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos da aplicação de formulações do Agrosilício com fontes de fósforo, no pH de solos. Foram testados um solo argiloso e outro arenoso. Os tratamentos foram compostos por combinações de fertilizantes com o Agrosilício e os controles, o Agrosilício, o superfosfato triplo e a testemunha sem nada adicionado, com 3 repetições. O milho foi a planta indicadora. Os resultados mostraram que o solo arenoso apresentou um aumento do pH do solo, ultrapassando os limites toleráveis as plantas (>8,0), enquanto no argiloso o pH ficou entre 5,5 a 7,0, ideal para o milho. Isso indica que seu uso como substituto dos carbonatos é uma opção para promover a descarbonização da agricultura, pois não emite CO<sub>2</sub> e contribui para a economia circular com o reuso de coprodutos.

**Palavras-chave:** Agrosilício; Silicatos; Remineralizadores; Mitigação Climática.

### STEEL CO-PRODUCTS: HOW THE CIRCULAR ECONOMY IN THE INDUSTRY CAN HELP DECARBONIZATION IN AGRICULTURE

#### Abstract

There is political pressure to reduce the greenhouse gases and to promote mitigatory measures and the circular economy, eliminating wastes and meeting the current government's emission goals. Strategies for this aim include to capture the CO<sub>2</sub> by reaction with silicates that mimics natural rock weathering processes, while neutralizing the soil acidity for agriculture. The aim of this work was to evaluate the effects of formulations of Agrosilicio with phosphorus sources in the soil pH. Two soils were essayed, one clayey and other sandy, and the treatments were eight combinations of fertilizers with Agrosilicio Plus and the controls, the Agrosilicio, the triple superphosphate and the soils without any fertilizer, with 3 replicates. The pearl millet was the indicator crop. The results showed that the sandy soil presented a steep increase in the pH (close to 8.0), surpassing the plant acceptable limit, while the pH for the clayey soil remained in the 5.5 to 7.0 range, ideal for millet. The results suggest that the use of the silicate to replace carbonates is an option to promote the agriculture decarbonization, as it does not emit CO<sub>2</sub>, and fosters the circular economy with the reuse of a co-product.

**Keywords:** Agrosilicio; Silicates; Remineralizers; Climate mitigation

<sup>1</sup> Engenheira Florestal, Doutora em Solos e Nutrição de Plantas, Pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, Minas Gerais.

<sup>2</sup> Engenheiro Agrônomo, Doutor em Solos e Nutrição de Plantas, Pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, Minas Gerais

## 1 INTRODUÇÃO

Há uma pressão política sobre o setor produtivo para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, promover medidas mitigatórias ou compensatórias e adotar a economia circular, eliminando a produção de resíduos. Em 2023, o governo federal anunciou a revisão da meta climática brasileira, se comprometendo a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 48% até 2025 e em 53% até 2030, para atender ao Acordo de Paris. A Confederação Nacional da Indústria afirma que a maior parte dos setores industriais tem potencial de mitigação de emissões de GEE nos médio e longo prazos, mas há um custo elevado estimado para descarbonizar a indústria brasileira, de cerca de R\$ 40 bilhões até 2050 (CNI, 2023).

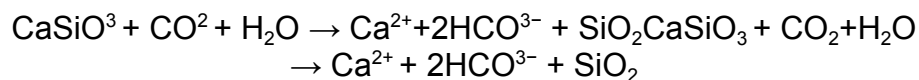
As estratégias de captura e armazenamento de carbono têm sido objeto de intensa pesquisa. As alternativas atuais para captura e estoque diretos de carbono têm problemas técnicos e custos elevados associados (Vinca et al., 2018). A busca por soluções eficazes para reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e mitigar os efeitos das mudanças climáticas tem levado à exploração de diversas estratégias inovadoras. Entre essas estratégias, destacam-se os processos de reação do CO<sub>2</sub> com materiais silicatados (naturais ou artificiais), que imitam os processos naturais de intemperismo de rochas e podem capturar CO<sub>2</sub> da atmosfera enquanto corrigem a acidez natural do solo, o que é necessário para a produção agrícola.

Desde os primeiros estudos sobre o clima da Terra, os cientistas têm procurado compreender os processos geológicos e geoquímicos que influenciam as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ao longo do tempo. Berner et al. (1983) destacam a importância dos processos geológicos na regulação do CO<sub>2</sub> atmosférico, ao longo de escalas de tempo geológicas significativas. Os autores propõem que a interação entre os ciclos carbonato-silicato, que envolvem a interação entre os carbonatos e as rochas silicatadas, desempenha um papel fundamental na regulação dos níveis de CO<sub>2</sub> na atmosfera. A partir de uma análise detalhada da literatura geológica e geoquímica disponível na época, Berner et al. (1983) apresentaram um modelo quantitativo dos ciclos carbonato-silicato e sua influência nos níveis de CO<sub>2</sub> atmosférico ao longo dos últimos 100 milhões de anos. Eles propõem que, durante períodos de intenso vulcanismo e intemperismo, as rochas silicatadas são intemperizadas, liberando silicatos e bicarbonatos de cálcio e magnésio para os oceanos. Estes íons são posteriormente precipitados como carbonatos no fundo oceânico. Esse processo remove CO<sub>2</sub> da atmosfera, diminuindo seu conteúdo ao longo do tempo. Por outro lado, durante períodos de tectônica de placas lenta e reduzida atividade vulcânica, a formação de carbonatos oceânicos diminui, resultando em um acúmulo gradual de CO<sub>2</sub> atmosférico. Os autores demonstram como esses processos geológicos influenciam os ciclos climáticos de longo prazo, afetando as temperaturas globais e o clima terrestre.

Vieira (2016) investigou a viabilidade da dissolução de silicatos (serpentinóis) como uma estratégia para a captura de CO<sub>2</sub> atmosférico formando carbonatos estáveis. Foram realizados experimentos laboratoriais para caracterizar a cinética e os mecanismos de dissolução destes materiais, avaliando seu potencial para a captura de CO<sub>2</sub> em escala industrial. Além de sequestrar CO<sub>2</sub> atmosférico, a dissolução dessas rochas pode resultar na formação de carbonatos, contribuindo para a redução da acidez do solo e melhorando sua fertilidade. Essa abordagem tem o potencial de combinar a mitigação das mudanças climáticas com a melhoria da qualidade do solo, fornecendo uma solução holística para os desafios ambientais

enfrentados atualmente. Além disso, este trabalho identifica possíveis desafios e oportunidades associados à implementação dessa tecnologia em larga escala.

Rajapaksha et al. (2019) investigaram o uso de coprodutos de siderurgia e biochar para a captura de carbono e melhoria da qualidade do solo. Ressaltaram a diversidade de materiais que podem ser utilizados na captura de CO<sub>2</sub> e destacaram a importância de considerar as diferentes características dos materiais para maximizar sua eficácia na mitigação das mudanças climáticas. Strefler et al. (2023) ofereceram uma análise abrangente do potencial e dos custos associados à remoção de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por meio da intemperização acelerada de rochas silicáticas. Este método envolve a aplicação controlada de minerais silicatados para absorver CO<sub>2</sub> da atmosfera através de reações químicas. O estudo apresenta equações químicas que descrevem o processo de intemperização acelerada de rochas silicáticas. Uma das equações fundamentais é a seguinte:



Esta equação mostra a reação entre o mineral silicatado (CaSiO<sub>3</sub>), o CO<sub>2</sub> atmosférico e a água, resultando na formação de bicarbonatos de cálcio (Ca<sup>2+</sup> e HCO<sup>3-</sup>) e sílica (SiO<sub>2</sub>). Essa reação é crucial para a captura de CO<sub>2</sub>, pois transforma o gás em formas carbonatadas que podem ser armazenadas de forma estável no ambiente. Os processos de carbonatação indireta visam capturar e armazenar o CO<sub>2</sub> atmosférico por meio da extração ácida de rochas silicatadas. Esses processos consomem o CO<sub>2</sub> durante a reação ácida, convertendo-o em carbonato. O intemperismo estimulado de rochas como dunito, serpentinito e basalto é uma das abordagens mais promissoras nesse sentido. Em regiões sujeitas ao intemperismo mais forte, como os trópicos úmidos, esses processos podem ser especialmente viáveis devido às condições climáticas favoráveis à alteração das rochas. As altas temperaturas e a umidade elevada aceleram o intemperismo das rochas silicatadas, aumentando assim a eficiência da captura de CO<sub>2</sub>.

Pesquisas, como as realizadas por Köhler et al. (2010), têm investigado a viabilidade desses processos em solos tropicais, destacando o potencial dessas regiões para o desenvolvimento de tecnologias de captura de carbono. A acidificação direta da rocha por ácidos puros, nesse caso, pode ser substituída por meio de sua mistura a solos ácidos, o que já é usualmente feito para a correção da acidez para uso agrícola, por meio de carbonatos (calcários). Coprodutos de siderurgia, como o Agrosilício, funcionam como os silicatos naturais, com o mesmo efeito do calcário sobre a acidez do solo. Rackley (2017) destaca a importância da carbonatação mineral como uma estratégia de mitigação das mudanças climáticas, fornecendo uma visão abrangente das reações químicas envolvidas e seus potenciais benefícios ambientais. Uma das equações fundamentais discutidas é a reação de carbonatação, que envolve a combinação de CO<sub>2</sub> atmosférico com minerais silicatados para formar carbonatos estáveis. Além das reações químicas envolvidas, Rackley (2017) discute os potenciais benefícios e desafios associados à carbonatação mineral. Entre os benefícios, estão a capacidade de armazenar CO<sub>2</sub> de forma permanente e a utilização de minerais abundantes e de baixo custo. No entanto, desafios como a necessidade de energia para moer e processar os minerais e a escala necessária para fazer uma diferença significativa na redução das emissões de CO<sub>2</sub> ainda precisam ser abordados.

A análise dos custos feitas por Strefler et al. (2023) mostra que, embora os custos iniciais possam ser significativos, a intemperização acelerada de rochas silicáticas pode se tornar economicamente viável com o desenvolvimento de tecnologias e políticas de apoio. O estudo também destaca a importância de considerar os benefícios adicionais dessa abordagem, como a melhoria da qualidade do solo e a redução da acidificação dos oceanos. Na mesma abordagem, Power et al. (2013), examina a viabilidade da utilização de resíduos de minas de níquel para a carbonatação mineral, e Renforth et al. (2011), avaliam o potencial da utilização de olivina para a captura de CO<sub>2</sub>. Essa abordagem, proposta por Renforth et al. (2011), oferece uma alternativa mais sustentável e econômica para a acidificação das rochas silicatadas, contribuindo para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

O uso mais viável que se visualiza para os coprodutos de siderurgia (silicatos de cálcio e magnésio), sob os pontos de vista econômico e ambiental, é a utilização na agricultura como neutralizadores da acidez do solo, substituindo o calcário. Produtos comerciais como o Agrosilício, já está no mercado, além do efeito benéfico como corretivo de solo, ajudam a alavancar a economia circular. Por muito tempo, esses produtos foram designados como rejeitos, gerando custos e um passivo ambiental, mas agora passam a gerar riqueza ao serem reinseridos no processo produtivo, agregando valor e contribuindo para os compromissos ambientais do setor industrial. O objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos da aplicação de novas formulações do Agrosilício no pH de solos agrícolas. Essas formulações incorporam fontes alternativas ricas em fósforo, provenientes de outros subprodutos industriais, visando agregar mais valor ao produto.

## 2. DESENVOLVIMENTO

### 2.1. Material e métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação em vasos de 5 litros contendo um solo argiloso, responsivo à adubação com P e à correção do solo e um solo arenoso, ambos classificados como Latossolos Vermelho Amarelos. Os tratamentos foram compostos por oito combinações das formulações de fertilizantes farelados com o Agrosilício Plus e os controles, o Agrosilício puro, o superfosfato triplo puro e a testemunha sem nenhum produto adicionado ao solo, totalizando 22 tratamentos, com 3 repetições e 72 unidades experimentais. A planta indicadora foi o milheto (variedade BRS-1502), sendo colocadas dez sementes por vaso e, aos cinco dias após a emergência, foi feito o desbaste deixando-se duas plantas por vaso. Foi realizada uma adubação básica no plantio contendo os nutrientes N e K (sulfato de amônio e KCl) e o experimento foi conduzido até 45 dias aproximadamente, sendo mantida a umidade dos vasos próxima à capacidade de campo por irrigação a cada 3 dias. Ao fim do período de cultivo, amostras foram coletadas em cada vaso e foi medido o pH em água dos solos por meio de eletrodo potenciométrico. Os dados obtidos foram submetidos às análises de variância, aos testes de médias e a análises de regressão para comparação dos tratamentos.

Tabela 1 – Tratamentos utilizados no experimento

Formulações	Identificação	Tratamento	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> % (média)	Proporções	Dose P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ha)	g/vaso
STP + Agrosilício	T1	Agro_STP_3pc	2,9	70% Agrosilício/ Agro100	240	31,1
Escória + Agrosilício	T2	Agro_Escoria_3pc	2,9	70% Agrosilício/ Agro100	240	31,2
Agro100 + Agrosilício	T3	Agro_Agro100_3pc	3,1	70% Agrosilício/ Agro100	240	29,9
Agro140 + Agrosilício	T4	Agro_Agro140_3pc	2,7	70% Agrosilício/ Agro100	240	34,0
STP + Agrosilício	T5	Agro_STP_6pc	5,6	50% Agrosilício/Agro100	240	16,2
Escória + Agrosilício	T6	Agro_Escoria_6pc	6,1	50% Agrosilício/Agro100	240	15,1
Agro100 + Agrosilício	T7	Agro_Agro100_6pc	6,8	50% Agrosilício/Agro100	240	13,3
Agro140 + Agrosilício	T8	Agro_Agro140_6pc	4,9	50% Agrosilício/Agro100	240	18,4
STP	T9	STP	45,1	---	240	2,0
Agrosilício	T10	Agrosilício	0,0	100% Agrosilício	0	15,0
Testemunha	T11	Testemunha	0,0	---	0	0

## 2.2. Resultados e Discussão

A aplicação dos tratamentos com Agrosilício afetou o pH nos solos. Os resultados mostraram comportamento distinto entre os solos estudados (Figura 1a). Os tratamentos que receberam as formulações com o Agrosilício com solo arenoso apresentaram um aumento significativo do pH do solo, chegando a valores próximos a 8,0 (Figura 2), já na primeira dose testada, com um efeito negativo no crescimento das plantas, como pode ser observado na Figura 1b.

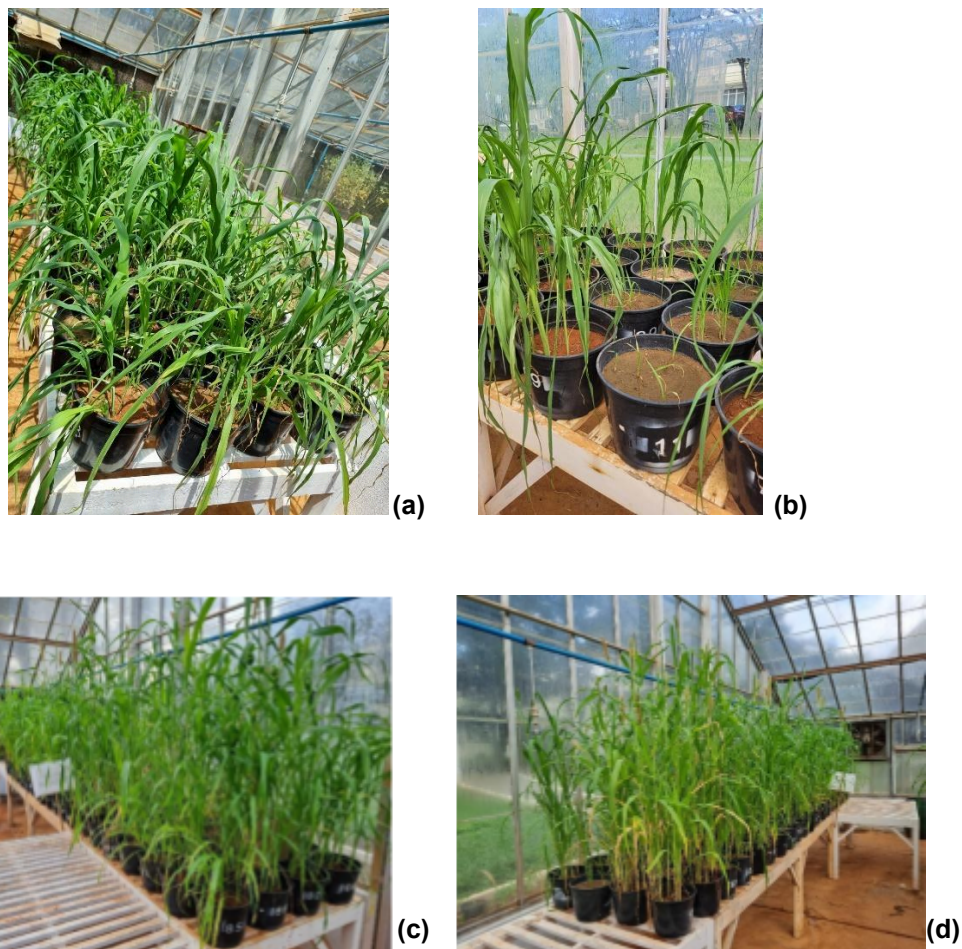
Os solos arenosos têm uma menor capacidade de tamponamento de pH devido menor conteúdo de argila e, conseqüentemente, de grupos de troca catiônica. Isso significa que eles são mais suscetíveis a mudanças no pH quando ácidos ou bases são adicionados, resultando em flutuações mais rápidas e significativas no pH do solo. Isso pode afetar a disponibilidade de nutrientes para as plantas, pois certos nutrientes podem se tornar mais ou menos disponíveis em diferentes faixas de pH.

No solo argiloso, o pH foi também corrigido na primeira dose aplicada, atingindo valores acima de 5,5, que estão na faixa ideal para o crescimento das plantas. Nas doses mais altas, estes valores de pH se mantiveram em um patamar próximo a 6,5, a faixa recomendada para a produção agrícola. Essa menor elevação se deve ao maior tamponamento deste solo, por sua maior proporção de argila. O milho é adaptável a uma ampla gama de condições de solo, e um pH do solo entre 6,0 e 7,5 é considerado ideal para seu crescimento saudável e produtivo (Andrews e Kumar, 1992), como observado na Figura 1c e 1d.

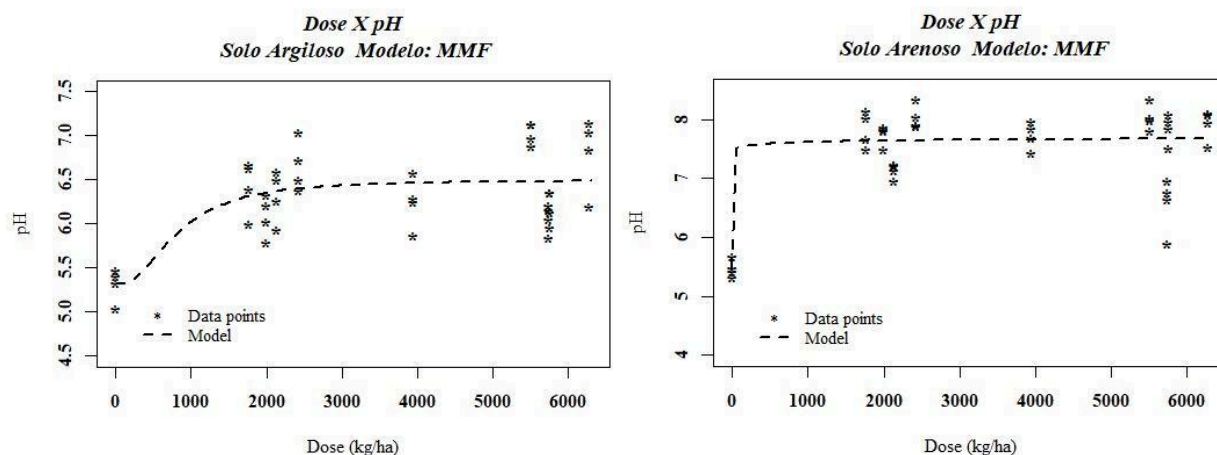
Os resultados indicam que o produto reagiu com o meio do solo durante o período do experimento, produzindo a neutralização da acidez do solo e a elevação do pH, em um processo que foi afetado pela granulometria do solo, atingindo um patamar de elevação de pH já nas primeiras doses usadas. Um estudo de Rezapour et al. (2019) comparou o tamponamento de pH em diferentes tipos de solos e encontrou resultados consistentes com estudos anteriores, destacando a importância da composição do solo na regulação do pH e na disponibilidade de nutrientes para as plantas.



Assim, são necessários trabalhos adicionais para calibração e recomendação das dosagens agrônômica e economicamente viáveis para uso pelos produtores, ajustados para as diversas granulometrias dos solos. O trabalho também aponta que o produto pode substituir o calcário, o corretivo de solo mais comum, pelo silicato industrial, com a dupla vantagem de promover a correção da acidez do solo sem usar um carbonato, com a redução de emissão direta de CO<sub>2</sub>, contribuindo para a descarbonização da agricultura, ao mesmo tempo que incorpora o subproduto ao processo produtivo, reduzido o passivo ambiental e contribuindo para a economia circular. Coprodutos de siderurgia, como o Agrosilício, apresentam reação alcalina quando submetidos à dissolução em água, devido à presença de silicatos e óxidos de cálcio e magnésio. Quando aplicadas ao solo ácido, estes reagem com os ácidos do solo, neutralizando a acidez e elevando o pH do solo para níveis mais adequados para o crescimento das plantas. Estudos realizados por Guimarães et al. (2023) mostram os efeitos benéficos do uso do Agrosilício na produção e acúmulo de nutrientes em pastagens.



**Figura 1.** Experimento instalado em casa de vegetação aos 30 dias de plantio.



**Figura 2.** Curvas de resposta de pH em função de doses de compostos de Agrosilício e diferentes fontes de fósforo.

### 3. CONCLUSÃO

O trabalho mostrou que o uso do Agrosilício como corretivo de solo proporcionou a elevação do pH em ambos os solos estudados, atingindo um patamar já na primeira dose usada. Isso indica que seu uso como substituto dos carbonatos naturais (calcários agrícolas) é uma opção interessante para promover a descarbonização da agricultura, pelo uso de um insumo que não emite CO<sub>2</sub>, ao mesmo tempo que contribui para a economia circular.

### Agradecimentos

Agradecemos à Harsco Environmental pela parceria no projeto “Desenvolvimento de fertilizantes a base de escória de siderurgia rica em silício enriquecidos com fósforo”, sob o código no SEG 30.22.90.015.00.00 da Embrapa, vinculado ao contrato 25100.22/0095-0 referente ao apoio financeiro para a condução dessa pesquisa.

### REFERÊNCIAS

Andrews, D.J., & Kumar, K.A. "Millets in Tropical Agriculture." International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 1992.

Berner, R. A., and Raiswell, R. Burial of organic carbon and pyrite sulfur in sediments over Phanerozoic time: A new theory: *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1983; 47: 855-862.

Confederação Nacional da Indústria (CNI). (2023). Estudo sobre custos de descarbonização da indústria brasileira. Brasília: CNI. [acesso em 20 abril. 2024] Disponível em:

<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/sustentabilidade/descarbonizacao-da-industria-ate-2050-vai-custar-cerca-de-r-40-bilhoes-diz-estudo-da-cni/>

Guimarães, M.G.; Rodrigues, N.F.; Alonso, J.M.; Clemente, E.P.; Stralio, R.; Donagemma, G.K.; Teixeira, P.C. Efeito da aplicação de fertilizante à base de coprodutos de siderurgia na produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes em *Panicum maximum*. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*. 2023; 16(11): 26194-26211.

Kohler, P.; Hartmann, J. and Wolf-Gladrow, D.A. Geoengineering potential of artificially enhanced silicate weathering of olivine. *Proc. Natl Acad. Sci.* 2010; 107: 20228-20233.

Power, I. et al. Carbon mineralization: from natural analogues to engineered systems. *Rev. Mineral. Geochem.* 2013. 77: 305-360

Rackley, S.A. *Mineral Carbonation, Carbon Capture and Storage*. 2010. 207-225. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-636-1.00010-9>

Rajapaksha, A.U.; Ok, Y.S.; El-Naggar, A.; Kim, H.; Song, F.; Kang, S. & Tsang, D.C.W. Dissolved organic matter (DOM) release from biochar produced from different feedstocks: Implications for water and nutrient retention. *Journal of Environmental Management*. 2017; 203 (1): 264–272.

Renforth, P.; Washbourne, C.L.; Taylder, J.; Manning, Silicate Production and Availability for Mineral Carbonation. *Environ. Sci. Technol.* 2011, 45(6), 2035–2041.

Strefler, J.; Amann, T.; Bauer, N.; Kriegler, E.; Hartmann, J. Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. *Environ. Res. Lett.* 2018, 13 034010.

Vieira, K.R.M. Estudo da reação de dissolução de serpentinitos brasileiros para uso em processo de captura de carbono. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2016, 170p.

Vinca, A., Marangoni, G., Parkinson, S., & Maréchal, F. Direct air capture of CO<sub>2</sub> with chemicals: optimization of a two-loop hydroxide carbonate system using a process model. *Environmental Science & Technology*. 2018, 52(22), 13438-13447.